

УДК: 537.911:539.21.

СТРУКТУРНЫЕ ПЕРЕХОДЫ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ**кандидат физико-математических наук, Тарасевич Д.В.,****Богдан О.В.**Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
Украина, Одесса

В статье представлен краткий обзор работ, посвященных явлению полиморфизма. Полиморфные переходы наблюдаются у многих веществ, в том числе и у кристаллов благородных газов, которые являются удобными объектами для построения теории, описывающей данное явление. На сегодняшний день, кристаллы изучаются в широком диапазоне давлений и температур, включая «экзотическую» область отрицательных давлений. Кроме того, использование современных технологий при постановке экспериментов дает возможность всесторонне исследовать различные объекты, даже в тех условиях, когда реальный эксперимент недоступен.

Ключевые слова: полиморфизм, ОЦК, ГЦК, аллотропные состояния, кристаллические модификации.

кандидат фізико-математичних наук, Тарасевич Д.В., Богдан О.В. Структурні переходи твердих речовин / Одеська державна академія будівництва та архітектури, Україна, Одеса

У статті подано короткий огляд робіт, присвячених явищу поліморфізму. Поліморфні переходи спостерігаються у багатьох речовин, в тому числі і у кристалів благородних газів, які є зручними об'єктами для побудови теорії, що описує дане явище. На сьогоднішній день, кристали вивчаються в широкому діапазоні тисків і температур, включаючи «екзотичну» область негативних тисків. Крім того, використання сучасних технологій при постановці експериментів дає можливість всебічно дослідити різні об'єкти, навіть в тих умовах, коли реальний експеримент недоступний.

Ключові слова: поліморфізм, ОЦК, ГЦК, алотропні стани, кристалічні модифікації.

PhD in Physico-mathematical sciences, Tarasevych D.V., Bogdan O.V. Structural transitions of solid substances / Odessa State Academy of Construction and Architecture, Odessa, Ukraine.

A brief overview of the works in this article devoted to the phenomenon of polymorphism. Polymorphic transitions are observed in many substances including crystals of noble gases which are convenient objects for constructing a theory describing the phenomenon. Today crystals are studied in a wide range of pressures and temperatures

including in the "exotic" sphere of negative pressures. Besides the use of modern technologies in the process of the experiments gives the possibility to explore various objects even in those conditions when a real experiment is not available.

Key words: polymorphism, bcc, fcc, allotropic states, crystalline modifications.

Введение.

На сегодняшний день хорошо известно, что одно и то же вещество в зависимости от температуры и давления, существовавших в момент кристаллизации, может находиться в различных кристаллических модификациях, при этом физические свойства могут отличаться. Данное явление широко исследовано на экспериментальном уровне (см. например [1-3]). Еще в 1798 году М. Клапротом было впервые обнаружено, что CaCO_3 имеет две модификации – кальцит и арагонит [4]. Надежно установлено, что явление полиморфизма наблюдается у многих веществ: металлов (белое и серое олово [5]), сплавов, неорганических (графит и алмаз) и органических (аспирин, сульфаниламид) молекул [6-11]. А в свете публикаций о влиянии полиморфизма на фармакологические свойства лекарственных препаратов [12], на физико-химические свойства других материалов, становится все более актуальным всесторонне изучение структурных переходов в кристаллах, определение границ таких переходов и влияющих факторов.

В качестве примера явления полиморфизма на рис. 1 приведена последовательность структурных превращений льда в широкой области температур и давлений [13]. Так природная конфигурация льда Ih имеет гексагональную кристаллическую структуру и устойчива при атмосферном давлении, это наиболее изученная форма льда. Модификация I при 2,5 ГПа и 25 °С переходит в II (близкую к гексагональной с тремя атомами в ячейке), с увеличением давления – в III (ГПУ), а при переохлаждении III переходит в конфигурацию IX. Лед IV-й модификации является метастабильной формой льда, V модификация имеет моноклинную кристаллическую структуру, VIII – это низкотемпературная форма льда VII. XIII имеет моноклинную конфигурацию, а XIV – ромбическую. Кроме того, новые модификации продолжают находить, так в 2016 была найдена XVII модификация льда [14]. Из выше сказанного видим, что хоть лед и является хорошо изученным, тем не менее, остается место для нахождения новых полиморфных модификаций и изучения их свойств.

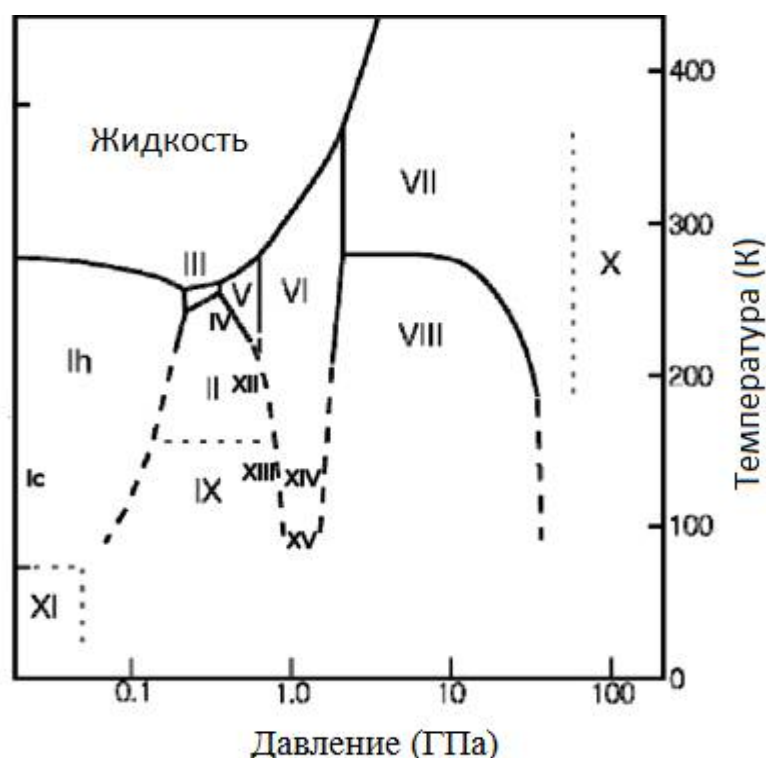


Рис. 1. Диаграмма состояния кристаллических льдов различных модификаций.

Изложение основного материала

Качественная картина явления полиморфизма состоит в том, что при полиморфном переходе атомы или молекулы кристалла смещаются, создавая другие устойчивые состояния, что приводит к изменению типа упаковки кристалла. Каждая модификация устойчива при определенных значениях давления и температуры. Кроме того, на устойчивость определенного полиморфного состояния могут влиять и другие внешние условия, например, примеси (известно, что алмаз содержит 0.15 % азота, а образованию арагонита CaCO_3 способствует микропримесь стронция [15]). Переход из одной модификации в другую связан с преодолением энергетического барьера. Если превращение происходит постепенно, путём зарождения и последующего роста в данной модификации областей новой фазы, то энергетический барьер является относительно малым и может преодолеваться за счёт тепловых флуктуаций. Одни вещества могут существовать в метастабильной фазе длительное время, тогда как другие, наоборот, легко переходят из одной модификации в другую при изменении температуры и/или других условий. Например, при атмосферном давлении и комнатной температуре алмаз является метастабильным и может существовать неограниченно долго, не превращаясь в стабильный в этих условиях графит. Поскольку превращение проходит через стадию сосуществования исходной и образующейся фаз, между фазами

возникает упругое взаимодействие, влияющее на характер протекания превращения. Это взаимодействие особенно проявляется при мартенситных превращениях, когда при перестройке кристаллической решетки, характерной для определенной фазы, образуется область, в которой на микроскопическом уровне присутствуют как сама эта фаза, так и зародыши новой фазы, занимающие объем порядка 1-10% всего объема фазы. Эта область, называемая мартенситной, может рассматриваться как отдельная фаза.

Мартенситные превращения были и остаются объектом интенсивного исследования на протяжении многих лет, поскольку описание особенностей изменения кристаллической модификации интересно не только как отдельная теоретическая, но и как важная прикладная проблема [16,17]. Надежные оценки термодинамических пределов существования различных полиморфных модификаций могут играть существенную роль при отборе материалов для использования в реальных устройствах [18]. С этой точки зрения кристаллы благородных газов являются наиболее удобными объектами, как для экспериментальных исследований, так и для теоретических построений.

В литературе неоднократно поднимался вопрос о возможных аллотропных состояниях кристаллов Kr, Xe, Ar [19-23]. Лишь сравнительно недавно появились экспериментальные свидетельства в пользу того, что ГЦК структура ксенона, которой он обладает при нормальных условиях, претерпевает переход мартенситного типа при значениях давления порядка 3 ГПа [19]. Было отмечено, что имеется обширная область давлений, в которой ксенон находится в некоторой «промежуточной» фазе, предполагающей сосуществование перемежающихся областей с ГЦК и ГПУ структурами, и только лишь при давлении больше 70 ГПа ксенон переходит в ГПУ фазу [19]. Попытка теоретически смоделировать кинетику процесса формирования подобных мартенситных структур как медленного накопления беспорядка при низких давлениях и искажения орторомбической структуры при высоких давлениях была предпринята в [23].

Современные экспериментальные исследования [19] указывают на то, что Xe при давлениях, превышающих несколько ГПа, заведомо не может существовать как равновесный макроскопический ГЦК кристалл. Это подразумевает, что должны существовать четкие ограничения на область термодинамических параметров, вне которой исходная (в данном случае – ГЦК) модификация не может более реализоваться в виде равновесной, бесконечно протяженной системы. В этой связи принципиально важной представляется задача получения достоверных теоретических оценок границ этой области.

Подчеркнем, что сам факт существования границ термодинамической устойчивости заданной кристаллической модификации в определенном смысле является основополагающим, поскольку при отсутствии таких границ вопрос об упомянутой выше «промежуточной» фазе [4] теряет смысл.

Заметим также, что к настоящему времени для квантовых кристаллов гелия получены определённые сведения о границах, разделяющих различные аллотропные модификации на фазовой диаграмме (см., например, экспериментальную работу [24] и модельные расчеты [25,26]). Что же касается «классических» кристаллов благородных газов (Kr, Xe), то вопрос о межфазных границах на их p – T диаграммах до сих пор остается малоизученным как на экспериментальном, так и на теоретическом уровнях (см., например, [27,28]).

Учитывая сказанное и основываясь на экспериментальных наблюдениях [19,20], представляют интерес теоретические работы [29], в которых было проанализировано поведение ГЦК решетки классических ван-дер-ваальсовых кристаллов (Kr, Xe) в области давлений \sim ГПа. Анализ осуществлялся на основе уравнений статистической теории кристаллов [30]. Кроме того, в [29] рассмотрен вопрос о термодинамической устойчивости ГЦК кристалла в области «холодного» плавления. В последнее время этот вопрос приобрел особую актуальность в связи с появлением результатов экспериментальных исследований конденсированных фаз в экстремальных условиях, создаваемых при воздействии на образцы ударных волн [17]. В результате этих исследований, проблема получения отрицательных давлений, представлявшаяся ранее как чисто академическая [1], перешла в область реальности (см. рис. 2.).

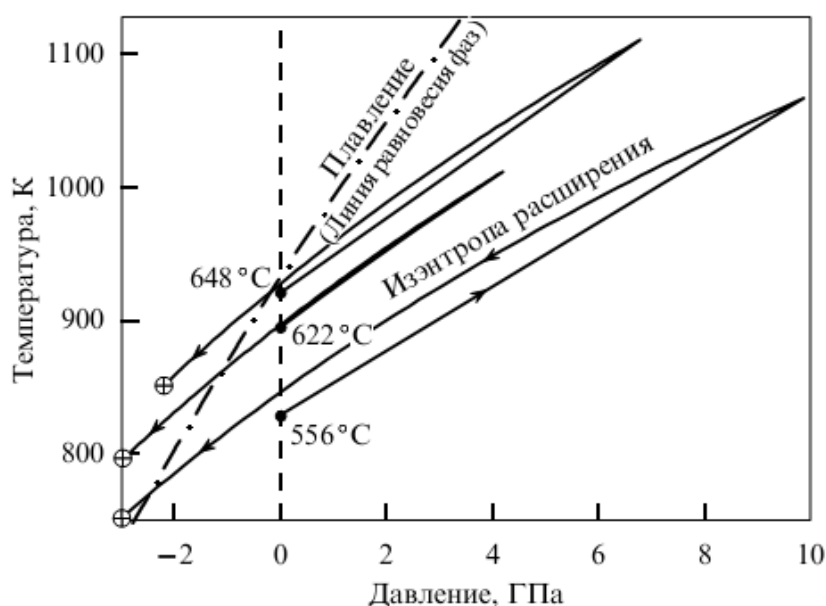


Рис. 2. Изменения состояния алюминия при ударном сжатии и последующем разрезении [17].

Принципиально важным представляется также вопрос о возможности существования «классических» кристаллов типа Ar в виде ОЦК модификации. Этот вопрос в очередной раз был поднят в связи с появившимся не так давно в литературе результатами компьютерных «экспериментов» [31]. Несмотря на то, что ОЦК фаза таких кристаллов по энергетическим соображениям оказывается заведомо не выгодной по сравнению с реальной ГЦК фазой [27], в работе [31] утверждалось, что в Хе при высоких давлениях (≈ 25 ГПа) и температурах (≈ 2700 К) имеется «островок стабильности» ОЦК фазы. Впоследствии эти результаты были поставлены под сомнение в работе [32]. В [33] представлен конкретный расчет границ термодинамической устойчивости ОЦК фазы таких кристаллов с использованием потенциала Леннарда-Джонса. Результаты этих расчетов показывают, что линия спинодали гипотетической ОЦК модификации должна целиком располагаться внутри области термодинамической устойчивости реальной ГЦК модификации на фазовой диаграмме кристаллов типа Ar. Это означает, что обсуждавшаяся в [31] возможность существования ОЦК области вне рассчитанных в работе [33] границ термодинамической устойчивости ОЦК фазы в «классических» кристаллах благородных газов едва ли может быть реализована.

Выводы.

Несмотря на большой интерес и значительные успехи, можем заключить, что такое явление, как полиморфизм до конца остается не изученным. Актуальным остается вопрос о построении теории, которая позволяла бы точно определять термодинамические характеристики при переходе вещества из одной кристаллической модификации в другую. Наконец, заметим, что и современное состояние экспериментальных исследований явления полиморфизма (аллотропии) кристаллов благородных газов также характеризуется значительной неопределенностью.

Литература:

1. Ландау Л.Д. *Статистическая физика. Часть 1* / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – [3-е изд.]. – М.: Наука, 1976. – 584 с. – («Теоретическая физика», том V).
2. Евдокимова В.В. *Некоторые закономерности фазовых p-T диаграмм и полиморфные превращения элементов при высоких давлениях* / В.В. Евдокимова // УФН. – 1966. – Т. 88. – С. 93 – 123.
3. Стишов С.М. *Плавление при высоких давлениях* / С.М. Стишов // УФН. – 1968. – Т. 96. – вып. 3. – С. 467 – 496.

4. Верма А. Рам. Полиморфизм и политипизм в кристаллах / А. Рам Верма, П. Кришна. – М.: Мир, 1969. – 274 с.
5. Физическая Энциклопедия: в 5 томах / [Под ред. А.М. Прохорова]. – М.: Советская Энциклопедия, Т. 4. – 1994. – 704 с.
6. Курдюмов Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 240 с.
7. Olson G.B. New directions in martensite theory / G.B. Olson // *Materials Science and Engineering A*. – 1999. – Vol. 273-275. – № 15. – P. 11-20.
8. Плотников В.А. Моделирование взрывной акустической эмиссии при мартенситных превращениях / В.А. Плотников // *письма в ЖЭТФ*. – 1998. – Т. 24. – № 1. – С. 31 – 38.
9. Ouvrard C. Toward Crystal Structure Prediction for Conformationally Flexible Molecules: The Headaches Illustrated by Aspirin / Carole Ouvrard, Sarah L. Price // *Crystal Growth & Design*. – 2004. – Vol. 4, № 6. – P. 1119 – 1127.
10. Бусыгина И.А. Исследование полиморфизма этинилэстрадиола / И.А. Бусыгина, А.И. Сливкин // *Вестник ВГУ, Серия: Химия. Биология. Фармация*. – 2008. – № 2. – С. 131 – 134.
11. Леонидов Н.Б. История развития концепции полиморфизма химических веществ (краткий очерк) / Н.Б. Леонидов // *Российский химический журнал*. – 1997. – Т. XLI, № 5. – С. 10 – 21.
12. Смирнова И.Г. Анализ кристаллической и пространственной структуры лекарственных веществ / И.Г. Смирнова, Г.Н. Гильдеева, В.В. Чистяков // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 2. Химия*. – 2012. – Т. 53, № 4. – С. 234-240.
13. Маленков Г.Г. Структуры элементов IV группы и твердых фаз воды / Г.Г. Маленков // *Журнал структурной химии*. – 2016. – Т. 57, №4. – С. 831-842.
14. Del Rosso L. Refined Structure of Metastable Ice XVII from Neutron Diffraction Measurements / L. del Rosso, F. Grazzi, M. Celli, D. Colognesi, V. Garcia-Sakai, and L. Ulivi // *J. Phys. Chem. C*. – 2016. – Vol. 120 (47). P. 26955-26959.
15. Бокий Г.Б. Кристаллохимия / Г.Б. Бокий. – М.: Наука, 1971. – 400 с.
16. Современная кристаллография: в 4 т. / Л.А. Шувалов, А.А. Урусовская, И.С. Желудев [и др.]. Т. 4 / [под ред. Б.К. Вайнштейна]. М.: Наука, 1981. – 96 с.
17. Каннель Г.И. Ударные волны в физике конденсированного состояния / Г.И. Каннель, В.Е. Фортков, С.В. Разоренов // *УФН*. – 2007. – Т. 177. – С. 809 – 830.
18. Физическая Энциклопедия: в 5 томах / [под ред. А. М. Прохорова]. – М.: Советская Энциклопедия, Т. 1. – 1988. – 548 с.

19. Cynn H. *Martensitic fcc-to-hcp transformation observed in xenon at high pressure* / H. Cynn, C.S. Yoo, B. Baer [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 86. – P. 4552 – 4555.
20. Errandonea D. *Phase behavior of krypton and xenon to 50 GPa* / D. Errandonea, B. Schwager, R. Boehler [et. al] // *Phys. Rev. B* – 2002. – Vol. 65. – 214110. – 6 p.
21. Jephcoat A.P. *Pressure-Induced Structural Phase Transitions in Solid Xenon* / A.P. Jephcoat, H.-k. Mao, L.W. Finger [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 59. – P. 2670 – 2673.
22. Errandonea D. *Structural transformation of compressed solid Ar: An x-ray diffraction study to 114 GPa* / D. Errandonea, R. Boehler, S. Japel [et. al] // *Phys. Rev. B* – 2006. – Vol. 73. – 092106. – 4 p.
23. Kim E. *Martensitic fcc-to-hcp Transformations in Solid Xenon under Pressure: A First-Principles Study* / E. Kim, M. Nicol, H. Cynn, C.S. Yoo // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96. – 035504. – 4 p.
24. Mao H.K. *High-pressure diagram and equation of state of solid helium from single-crystal X-ray diffraction to 23.3 GPa* / H.K. Mao, R.J. Hemley, Y. Wu [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 60. – P. 2649 – 2652.
25. Holian B.L. *Predictions of the solid helium phase diagram* / B.L. Holian, W.D. Gwinn, A.C. Luntz [et. al] // *J. Chem. Phys.* – 1973. – Vol. 59. – P. 5444 – 5455.
26. Loubeyre P. *Three-body exchange interaction in dense helium* / P. Loubeyre // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58. – P. 1857 – 1860.
27. Boehler R. *High-Pressure Melting Curves of Argon, Krypton, and Xenon: Deviation from Corresponding States Theory* / R. Boehler, M. Ross, P. Söderlind [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 86. – P. 5731 – 5734.
28. Datchi F. *Extended and accurate determination of the melting curves of argon, helium, ice (H₂O), and hydrogen (H₂)* / F. Datchi, P. Loubeyre, R. LeToullec // *Phys. Rev. B* – 2000. – Vol. 61, № 10. – 092106. – P. 6535 – 6546.
29. Бондарев В.Н. *Статистическая теория термодинамической устойчивости кристаллических фаз* / В.Н. Бондарев, Д.В. Тарасевич // *ФТТ*. – 2010. – Т. 52, вып. 6. – С. 1156 – 1162.
30. Bondarev V. N. *Statistical theory of noble-gas crystals and the phenomenon of sublimation* / V. N. Bondarev // *Phys. Rev. E*. – 2005. – Vol. 71, № 5. – 051102 – 12 p.
31. Belonoshko A.B. *Molecular Dynamics Study of Melting and fcc-bcc Transitions in Xe* / A.B. Belonoshko, R. Ahuja, B. Johansson // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 87. – 165505. – 4 p.
32. Kechin V.V. *Comment on “Molecular Dynamics Study of Melting and fcc-bcc Transitions in Xe”* / V.V. Kechin // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 89. – 119601. – 1 p.

33. Бондарев В.Н. Границы термодинамической устойчивости классических кристаллов благородных газов и проблема полиморфизма / В.Н. Бондарев, Д.В. Тарасевич // ФНТ. – 2011. – Т. 37, №. 7. – С. 752 – 763.

References:

1. Landau L.D. *Statisticheskaya fizika. Chast 1* / L.D. Landau, Ye.M. Lifshits. – [3-e izd.]. – M.: Nauka, 1976. – 584 s. – («Teoreticheskaya fizika», tom V).
2. Yevdokimova V.V. *Nekotorye zakonomernosti fazovykh p-T diagramm i polimorfnye prevrashcheniya elementov pri vysokikh davleniyakh* / V.V. Yevdokimova // UFN. – 1966. – Т. 88. – С. 93 – 123.
3. Stishov S.M. *Plavlenie pri vysokikh davleniyakh* / S.M. Stishov // UFN. – 1968. – Т. 96. – вып. 3. – С. 467 – 496.
4. Verma A. Ram. *Polimorfizm i politipizm v kristallakh* / A. Ram Verma, P. Krishna. – M.: Mir, 1969. – 274 s.
5. *Fizicheskaya Entsiklopediya: v 5 tomakh* / [Pod red. A.M. Prokhorova]. – M: Sovetskaya Entsiklopediya, T. 4. – 1994. – 704 s.
6. Kurdyumov G.V. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* / G.V. Kurdyumov, L. M. Utevskiy, R.I. Entin. – M: Nauka, 1977. – 240 c.
7. Olson G.B. *New directions in martensite theory* / G.B. Olson // *Materials Science and Engineering A*. – 1999. – Vol. 273-275. – № 15. – P. 11-20.
8. Plotnikov V.A. *Modelirovanie vzryvnoy akusticheskoy emissii pri martensitnykh prevrashcheniyakh* / V.A. Plotnikov // *pisma v ZhETF*. – 1998. – Т. 24. – № 1. – С. 31 – 38.
9. Ouvrard C. *Toward Crystal Structure Prediction for Conformationally Flexible Molecules: The Headaches Illustrated by Aspirin* / Carole Ouvrard, Sarah L. Price // *Crystal Growth & Design*. – 2004. – Vol. 4, № 6. – P. 1119 – 1127.
10. Busygina I.A. *Issledovanie polimorfizma etinilestradiola* / I.A. Busygina, A.I. Slivkin // *Vestnik VGU, Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*. – 2008. – № 2. – С. 131 – 134.
11. Leonidov N.B. *Istoriya razvitiya kontseptsii polimorfizma khimicheskikh veshchestv (kratkiy ocherk)* / N.B. Leonidov // *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. – 1997. – Т. XLI, № 5. – С. 10 – 21.
12. Smirnova I.G. *Analiz kristallicheskoy i prostranstvennoy struktury lekarstvennykh veshchestv* / I.G Smirnova, G.N. Gildeeva, V.V. Chistyakov // *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 2. Khimiya*. – 2012. – Т. 53, № 4. – С. 234-240.
13. Malenkov G.G. *Struktury elementov IV gruppy i tverdykh faz vody* / G.G. Malenkov // *Zhurnal strukturnoy khimii*. – 2016. – Т. 57, №4. – С. 831-842.
14. Del Rosso L. *Refined Structure of Metastable Ice XVII from Neutron Diffraction Measurements* / L. del Rosso, F. Grazzi, M. Celli, D. Colognesi, V. Garcia-Sakai, and L. Ulivi // *J. Phys. Chem. C*. – 2016. – Vol. 120 (47). P. 26955-26959.

15. Bokiy G.B. *Kristallokhiimiya* / G.B. Bokiy. – M.: Nauka, 1971. – 400 s.
16. *Sovremennaya kristallografiya: v 4 t.* / L.A. Shuvalov, A.A. Urusovskaya, I.S. Zheludev [i dr.]. T. 4 / [pod red. B.K. Vaynshteyna]. M.: Nauka, 1981. – 96 s.
17. Kannel G.I. *Udarnye volny v fizike kondensirovannogo sostoyaniya* / G.I. Kannel, V.Ye. Fortov, S.V. Razorenov // *UFN.* – 2007. – T. 177. – S. 809 – 830.
18. *Fizicheskaya Entsiklopediya: v 5 tomakh* / [pod red. A. M. Prokhorova]. – M.: Sovetskaya Entsiklopediya, T. 1. – 1988. – 548 s.
19. Cynn H. *Martensitic fcc-to-hcp transformation observed in xenon at high pressure* / H. Cynn, C.S. Yoo, B.Baer [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 86. – P. 4552 – 4555.
20. Errandonea D. *Phase behavior of krypton and xenon to 50 GPa* / D. Errandonea, B. Schwager, R. Boehler [et. al] // *Phys. Rev. B* – 2002. – Vol. 65. – 214110. – 6 p.
21. Jephcoat A.P. *Pressure-Induced Structural Phase Transitions in Solid Xenon* / A.P. Jephcoat, H.-k. Mao, L. W. Finger [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 59. – P. 2670 – 2673.
22. Errandonea D. *Structural transformation of compressed solid Ar: An x-ray diffraction study to 114 GPa* / D. Errandonea, R. Boehler, S. Japel [et. al] // *Phys. Rev. B* – 2006. – Vol. 73. – 092106. – 4 p.
23. Kim E. *Martensitic fcc-to-hcp Transformations in Solid Xenon under Pressure: A First-Principles Study* / E. Kim, M. Nicol, H. Cynn, C.S. Yoo // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96. – 035504. – 4 p.
24. Mao H.K. *High-pressure diagram and equation of state of solid helium from single-crystal X-ray diffraction to 23.3 GPa* / H.K. Mao, R.J. Hemley, Y. Wu [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 60. – P. 2649 – 2652.
25. Holian B.L. *Predictions of the solid helium phase diagram* / B.L. Holian, W.D. Gwinn, A.C. Luntz [et. al] // *J. Chem. Phys.* – 1973. – Vol. 59. – P. 5444 – 5455.
26. Loubeyre P. *Three-body exchange interaction in dense helium* / P. Loubeyre // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58. – P. 1857 – 1860.
27. Boehler R. *High-Pressure Melting Curves of Argon, Krypton, and Xenon: Deviation from Corresponding States Theory* / R. Boehler, M. Ross, P. Söderlind [et. al] // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 86. – P. 5731 – 5734.
28. Datchi F. *Extended and accurate determination of the melting curves of argon, helium, ice (H₂O), and hydrogen (H₂)* / F. Datchi, P. Loubeyre, R. LeToullec // *Phys. Rev. B* – 2000. – Vol. 61, № 10. – 092106. – P. 6535 – 6546.
29. Bondarev V.N. *Statisticheskaya teoriya termodinamicheskoy ustoychivosti kristallicheskikh faz* / V.N. Bondarev, D.V. Tarasevich // *FTT.* – 2010. – T. 52, vyp. 6. – S. 1156 – 1162.

30. Bondarev V.N. *Statistical theory of noble-gas crystals and the phenomenon of sublimation* / V.N. Bondarev // *Phys. Rev. E.* – 2005. – Vol. 71, № 5. – 051102 – 12 p.
31. Belonoshko A.B. *Molecular Dynamics Study of Melting and fcc-bcc Transitions in Xe* / A.B. Belonoshko, R. Ahuja, B. Johansson // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 87. – 165505. – 4 p.
32. Kechin V.V. *Comment on “Molecular Dynamics Study of Melting and fcc-bcc Transitions in Xe”* / V.V. Kechin // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 89. – 119601. – 1 p.
33. Bondarev V.N. *Granitsy termodinamicheskoy ustoychivosti klassicheskikh kristallov blagorodnykh gazov i problema polimorfizma* / V.N. Bondarev, D.V. Tarasevich // *FNT.* – 2011. – T. 37, №. 7. – S. 752 – 763.